

## 5 Das Gehirn: Ebenbild der Welt

### Die Macht der Fasern

Das Gehirn ist der Angelpunkt, um den sich meine Weltanschauung dreht. Einerseits mein eigenes Gehirn als der Ort, wo all mein Wissen zusammenkommt, um dann – um ein paar Gedanken bereichert – zu diesem Text zu werden. Andererseits das Gehirn im Allgemeinen, jenes Stück komplex organisierter Materie, das, als kleiner Teil der Welt, die ganze Welt in sich spiegelt, bei jedem Tier anders, für jedes das Abbild seiner besonderen Welt, in der es die ihm eigenen Möglichkeiten realisieren kann.

Wozu braucht ein Tier ein Gehirn? Um auf die verschiedenen Einflüsse, die das Tier aus seiner Umgebung erreichen, auf bestmögliche Weise zu reagieren. Mechanische, chemische, elektromagnetische (z. B. Licht) „Reize“ führen zu Bewegungen, chemischen Absonderungen, elektrischen Entladungen, die in der Situation, die die Reize signalisieren, dem Tier jeweils die besten Chancen bieten.

Das ist allerdings noch kein Beweis für die Notwendigkeit eines Gehirns, denn „vernünftige“ Reaktionen auf solche Reize gibt es auch bei Lebewesen,

die über keinerlei Gehirn verfügen. Die Wurzeln mancher Pflanzen „perzipieren“ die Schwerkraft und „reagieren“ darauf, indem sie nach unten wachsen. Manche Pflanzen wenden sich dem Licht zu. Winzige gehirnlose Einzeller lassen sich von gewissen im Wasser gelösten Stoffen, von Licht oder von Wärme anlocken oder auch abstoßen. Auch bei Tieren gibt es Reaktionen, die ganz ohne Gehirn ablaufen. Wo die Haut mechanisch stark belastet ist, auf den Fußsohlen z.B. oder links unter dem Kinn beim Geiger, bilden sich Schwielen. Menschenhaut wird gebräunt, das heißt sie reichert Pigment an, wenn sie von Sonnenstrahlung getroffen wird, um sich dagegen zu schützen.

Wozu das Gehirn gut ist, erkennen wir, wenn wir seine wichtigsten Eigenschaften betrachten. Eine Vorbemerkung: Wenn ich hier und im Folgenden vom „Gehirn“ spreche, meine ich vereinfachend das gesamte Nervengewebe: bei Wirbeltieren Großhirn, Kleinhirn, Hirnstamm, Rückenmark zusammen mit dem peripheren Nervensystem, bei Würmern und Gliedertieren die ganze Kette ihrer sogenannten Ganglien mit den angeschlossenen Nerven, bei einer Qualle ein lockeres Geflecht von Nervenzellen.

Gehirne sind faserig

Das Nervengewebe erscheint zunächst als ein unentwirrbares Durcheinander von Fasern. *Durcheinander* ist das Merkmal, durch das sich Gehirne von anderen faserigen Geweben, zum Beispiel von Muskeln und Sehnen, unterscheiden. Während die parallel angeordneten Fasern eines Muskels oder einer Sehne alle ungefähr die gleiche Funktion haben, nämlich in einer Richtung zu ziehen oder gezogen zu werden, deutet das viel kompliziertere Geflecht der Nervenfasern auf ein weitaus raffinierteres Zusammenspiel hin.

Eine faserige Struktur, zum Beispiel das Telephonnetz einer Stadt, hat zur Folge, dass Orte, die im Raum weit auseinander liegen, durch ihre telephonische Verbindung sozusagen zu Nachbarn werden, während unter Umständen räumlich benachbarte Orte, wie zwei Wohnungen im selben Haus, die nicht an das Telephonnetz angeschlossen sind, telephonisch gesprochen unendlich weit voneinander entfernt sind. Bei einem solchen Netzwerk ist der Abstand zwischen zwei Punkten nicht mehr, wie sonst, die kürzeste geradlinige Verbindung, sondern die Länge des Weges, über den man über möglichst wenige Zwischenstationen von einem zum anderen gelangt. Die Verbin-

dungsstruktur in einem Fasernetz ist frei von den geometrischen Gesetzen, die in einem homogenen 3-dimensionalen Medium die Nachbarschaftsverhältnisse und Abstände bestimmen.

Das Gesagte trifft allerdings nur zu, wenn die Beziehungen, die verschiedene Orte im Fasernetz miteinander haben, tatsächlich durch die Fasern vermittelt werden, und zwar in ihrer Längsrichtung, von einem Ende zum anderen. Bei einem Telephonnetz ist das so: Auch wo die Fasern (Drähte) in dicken Zöpfen nebeneinander her oder quer zu einander verlaufen, ist durch geeignete Isolierung dafür gesorgt, dass die Signale in einem Draht unterwegs nicht auf die daneben liegenden Drähte überspringen. In den Gehirnen gilt dasselbe Prinzip. Um das zu verstehen, müssen wir auf die Eigenschaften der *Neuronen*, der Elemente der Signalübertragung im Gehirn, eingehen.

#### Nervenzellen (Neuronen)

Ein menschliches Gehirn enthält einige zehntausend Millionen Nervenzellen, ungefähr so viele, wie es heute Menschen auf der Erde gibt. Im Gehirn einer Maus beträgt ihre Zahl wenig mehr als ein Tausendstel davon, im Kopf einer Fliege sind es immerhin noch einige Hunderttausend.

Es ist erstaunlich, wie ähnlich die Nervenzellen oder Neuronen in den Gehirnen der verschiedenen Tiere (vom Mensch bis zum Tintenfisch bis zum Floh) aussehen und wie verschieden sie andererseits von allen übrigen Zellen des Körpers sind. Die meisten anderen Zellen sind kugelige oder stäbchenförmige Gebilde, die eng gepackt in zwei- oder dreidimensionalen Geweben angeordnet sind oder auch locker in einer Flüssigkeit herumschwimmen.

**Nervenzellen sind sternförmig** Sie haben einen Zellkörper, der den Zellkern und wenig anderes enthält und von dem mehrere dünne, meist verzweigte Fortsätze ausgehen. Die Länge dieser faserförmigen Fortsätze variiert zwischen wenigen Hundertstel Millimeter und mehr als einem Meter. Auf jeden Fall sind sie im Durchschnitt viel länger als der durchschnittliche Abstand zwischen benachbarten Neuronen im Gewebe, was dazu führt, dass Neuronen mit ihren faserigen Fortsätzen ineinander verschränkt sind und zusammen ein dichtes Geflecht bilden. Das gesamte Volumen dieses Geflechts ist um ein Vielfaches größer als das aller Nervenzellkörper zusammengenommen. Die Gesamtlänge aller Fasern, die Summe ihrer einzelnen Längen, ist unvorstellbar groß. Sie beträgt in einem Kubikmillimeter Nervengewebe (in einem stecknadel-

kopfgroßen Würfelchen) einige Kilometer Fasern, woraus sich für ein einziges Menschenhirn eine Gesamtlänge von einigen Millionen Kilometer errechnet, also soviel wie die Strecke von der Erde bis zum Mond und zurück und noch ein gutes Stück mehr.

Wenn man genauer hinsieht, entdeckt man, dass es zweierlei Sorten von Fasern gibt, im Fachjargon *Dendriten* und *Axone*. Sie unterscheiden sich schon allein dadurch, dass aus jeder Nervenzelle nur ein einziges Axon entspringt, aber mehrere Dendriten (bis zu zehn und bei manchen auch mehr). Fast immer sind Axone länger als Dendriten, reichen also viel weiter im Geflecht als diese. Die wichtigsten Unterschiede zwischen den zwei Sorten von Fasern zeigen sich aber in der Weise, wie sie Signale übertragen.

**Signalleitung auf Axonen** Das physikalisch-chemische Geschehen, das einem *Signal* im Nervengewebe zugrunde liegt, ist recht kompliziert, genauestens untersucht und auch weitgehend verstanden, aber für die Art der Beschreibung, die ich mir hier vorgenommen habe, im Detail nicht relevant. Nur so viel: Die entscheidenden Phänomene spielen sich an der Oberfläche des Neurons ab, auf der sogenannten *Nervenzellmembran*, einem dünnen Häutchen, das das Axon röhrenförmig umgibt und normalerweise elektrisch

geladen ist, innen negativ und außen positiv. (Grund dafür ist die Verteilung verschiedener Ionen im Inneren und in der Umgebung des Neurons.) Wenn gewisse chemische oder elektrische Reize an einer Stelle auf das Axon treffen, bricht die Ladung zusammen und geht kurzfristig (eine Millisekunde lang) sogar in eine entgegengesetzte Ladung über, innen positiv und außen negativ. Diese stürmische, auf kleinen Raum beschränkte Störung in der elektrischen Ladung der Nervenzellmembran erzeugt in den benachbarten Membranstücken desselben Axons ein elektrisches Ungleichgewicht, das dort denselben stürmischen Vorgang auslöst und so weiter bis zum Ende des Axons. Das Phänomen, *Aktionspotential* oder meistens englisch *spike* genannt, lässt sich mit elektrischen Sonden (isolierten, ins Gewebe eingestochenen Nadeln oder *Mikroelektroden*) leicht beobachten und ist die Grundlage von fast allem, was die *Elektrophysiologie* im letzten halben Jahrhundert an Detailwissen über Gehirnfunktionen zutage gefördert hat.

Das Phänomen *Spike auf dem Axon* lädt zu allgemeineren Spekulationen ein:

Erstens, der Spike ist ein Signal, das entweder mit voller Stärke auftritt oder gar nicht. Man erkennt darin ein Prinzip, das auch bei den sogenannten digitalen

Computern gilt, nämlich die Codierung der Informationen in einem *binären Code*, bei dem nur zwei Zustände als Zeichen gelten. Beim Computer sind dies das Auftreten oder das Fehlen einer elektrischen Spannung, meist als 1 und 0 bezeichnet, beim Axon der Spike beziehungsweise der Ruhezustand. Das hat zur Deutung von Nervennetzen als digitale Rechenanlagen geführt, deren Funktion in der Sprache der „binären Logik“ beschrieben werden kann. Darüber mehr im nächsten Kapitel.

Zweitens unterscheidet die Signalleitung im Nervensystem sich ganz wesentlich von anderen Arten der Signalausbreitung, z.B. von Schall in der Luft oder von elektrischen Signalen in einem Draht, und zwar durch die Tatsache, dass ein Spike, wenn er an einem Axon einmal ausgelöst ist, ohne Abschwächung bis zum Ende des Axons weiterläuft und auch bei verzweigten Axonen sich in voller Stärke in alle Verzweigungen fortpflanzt. Andere Signale verlieren unterwegs einen Teil ihrer Kraft, je weiter sie wandern, desto mehr, aus verschiedenen wohlbekanntem Gründen (z.B. weil sie das Medium, in dem sie sich fortpflanzen, erwärmen). Anders der Spike auf dem Axon, der Schritt für Schritt durch die in der elektrischen Ladung der Membran gespeicherte Energie verstärkt,

sozusagen verjüngt wird und so in voller Frische ankommt. Vergleichbar ist diese Art der Signalübertragung mit einem Lauffeuer im dünnen Gras oder mit dem Abbrennen einer Zündschnur, bei der die Energie für das Signal (d.h. für das Feuer) im Schießpulver gespeichert ist und nicht vom Signal mitgeführt werden muss. Deshalb kann ein geschickter Kannonier eine Lunte mehrfach verzweigen und hat trotzdem die Gewissheit, dass das Feuer, wundersam vermehrt, überall unvermindert ankommt. Voraussetzung für die, wie man so schön sagt, *dekrementlose* Leitung des Spikes auf dem Axon ist, dass die elektrische Ladung der Nervenzellmembran, also die für den Spike nötige Energie (sozusagen das Pulver auf der Zündschnur) stets zur Verfügung steht. In der Tat, nachdem die elektrische Ladung auf der Membran durch einen Spike verbraucht ist, wird sie rasch wieder aufgebaut, aber wie das genau geschieht, gehört zu der Biophysik, die ich dem Leser ersparen wollte. Die Wiederherstellung der Ladung auf dem Axon nimmt wenige Millisekunden in Anspruch, sodass ein Axon, wenn es stark gereizt wird, bis zu einigen hundert Mal in der Sekunde einen Spike „feuern“ kann. Zur Vervollständigung des Bildes: Die Geschwindigkeit, mit der sich Spikes auf dem Axon fortpflanzen,

variiert zwischen einem halben Meter und über hundert Meter pro Sekunde (zwischen der Geschwindigkeit eines Begräbniszugs und der eines Flugzeugs), in Abhängigkeit von der Faserdicke: je dicker, desto schneller. Auch erhöht sich die Leitungsgeschwindigkeit, wenn das Axon von einer fettigen, elektrisch isolierenden Hülle (*Markscheide, Myelin*) umgeben ist, was nicht bei allen Axonen der Fall ist. Die Leitungsgeschwindigkeit ist auch bei den schnellsten Fasern knapp halb so groß wie die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft und sehr viel kleiner als die Geschwindigkeit von elektrischen Signalen auf einem Draht, aber offenbar doch schnell genug für die Bedürfnisse des Gehirns. Immerhin braucht ein Spike, der sich 10 cm weit von einem Winkel des Gehirns zum anderen entlang einer dicken Faser bewegt, kaum eine Millisekunde.

Ein Gedanke zur Zündschnur-artigen Spikeleitung auf den Axonen: Wer immer ein funktionierendes Netzwerk aus reichverzweigten Axonen konstruieren wollte, hat eine Sorge nicht, die einen anderen plagt, der dafür nur elektrische Leitungen zur Verfügung hätte, wie in einem Telephonnetz oder einem Computer. Wie gesagt, wo sich ein Draht verzweigt, müssen sich die beiden Signale nach der Verzweigung die